System Engineering and Productivity/ 2025/ Vol.5/ No.2/ 1-16

System Engineering and Productivity

DOI: 10.22034/sep.2025.2049011.1245

Evaluation of Water Treatment Technologies in Water-Intensive Industries Under Cap-and-Trade Strategy: A Game-Theoretic Approach

Mohammad-Bagher Jamali [1*], **Mohammad-Ali Eghbali** [2]

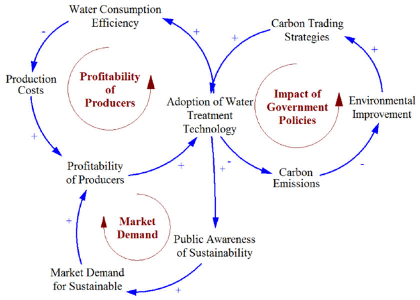
[1] Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

[2] Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Computer and Industrial Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

HIGHLIGHTS

- Examining how government subsidies affect production, carbon emissions, and costs.
- Exploring policies to lower carbon footprints and enhance industrial environmental performance.
- Analysis of decision-making in water intensive industries influenced by government intervention.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 1 January 2025
Revised: 7 February 2025
Accepted: 17 February 2025
Available online: 17 February 2025

*Correspondence:
mb.jamali@sutech.ac.ir

How to cite this article:
Jamali, M., & Eghbali, M. (2025). Evaluation of water treatment technologies in water-intensive industries Under cap-and-trade strategy: A game-theoretic approach. *System Engineering and Productivity*, 5(2), 1-16.

Keywords:
Carbon trading
Water-intensive industries
Environmental pollution
Stackelberg model
Game theory

ABSTRACT

Water-intensive industries such as steel production, with a significant carbon footprint in both production stages and water treatment processes, play a major role in environmental pollution. This issue has prompted governments to develop policies and mechanisms aimed at reducing carbon emissions in these industries. One such policy is carbon trading—a mechanism in which each company is allocated a specific carbon emission quota. Companies that exceed this quota face penalties, while those with lower emissions can sell their surplus quotas to others. This study employs a Stackelberg game model, where the government acts as the leader and producers as the followers. Using game theory, the effects of government subsidies on the equilibrium values of decision variables, including production levels, carbon emissions, and costs, are analyzed. The results of this analysis provide valuable insights for governments and producers in formulating effective policies to reduce the carbon footprint and improve the environmental performance of industries. By offering practical insights into economic and environmental interactions, this research plays a crucial role in understanding the impact of governmental policies on decision-making in water-intensive industries.

2538-2195/© 2026 The Authors. Published by University of Eyvanekey. This is an open-access article under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license.

1. Introduction

Water-intensive industries, particularly steel manufacturing, are major contributors to environmental degradation and greenhouse gas emissions. These industries face a dual challenge: managing high levels of water consumption while mitigating the environmental impacts of wastewater treatment processes. Traditional production activities generate substantial carbon emissions, and the water treatment technologies employed to handle industrial effluents are themselves carbon-intensive. Consequently, the cumulative carbon footprint of such industries is significant, making them a central focus of sustainable development and climate policy debates.

Governments have implemented regulatory mechanisms such as cap-and-trade schemes, under which industries are allocated carbon emission allowances. Companies emitting less than their quota may trade surplus credits, while those exceeding it must purchase additional allowances or incur penalties. Although such policies incentivize cleaner technologies, their effectiveness in water-intensive industries, where profitability is strongly linked to production scale and water treatment costs—depends heavily on the strategic interactions between regulators and producers. The novelty of this study lies in its integrated evaluation of cap-and-trade mechanisms and water treatment subsidies from a game-theoretic perspective. Unlike previous research that examined these policies separately, this study highlights their interdependence and simultaneous effects. The results provide practical insights for policymakers on designing balanced and adaptive environmental policies that safeguard both industrial competitiveness and sustainability objectives (Jamali et al., 2022; Norang et al., 2010).

2. Problem definition

Water-intensive industries such as steel manufacturing face the dual challenge of excessive resource consumption and substantial carbon emissions, further aggravated by the carbon-intensive nature of wastewater treatment. Although policies such as cap-and-trade schemes are designed to curb emissions, their effectiveness is uncertain due to the complex feedback among government interventions, producer profitability, and consumer demand. To capture these dynamics, this research employs a game-theoretic framework, specifically a Stackelberg game model, in which the government acts as the leader by setting regulatory policies such as subsidies for water treatment or penalties for excessive emissions, while producers, as followers, determine production levels, emission-reduction strategies, and investments in treatment technologies. This hierarchical structure enables the evaluation of equilibrium outcomes—including production volumes, emission levels, costs, and profitability—and provides a rigorous basis for examining the trade-offs between environmental sustainability and economic viability.

3. Results and Discussion

The findings highlight that while environmentally beneficial, significant upgrades in water treatment technologies are economically unfeasible for producers, as they sharply reduce profit margins, making compliance through advanced treatment or the purchase of additional emission allowances equally viable from a profitability perspective. On the regulatory side, increasing the weight of carbon costs by raising carbon pricing coefficients could theoretically drive emission reductions, but such measures are strongly opposed by producers due to their adverse impact on competitiveness. Moreover, the effects of cap-and-trade policies are scale-dependent: at lower production levels, inexpensive allowances may encourage emissions, whereas at higher scales, the rising marginal cost of purchasing credits discourages excessive emissions. Importantly, the study shows that an integrated policy framework—combining cap-and-trade mechanisms with targeted water treatment subsidies—can mitigate the economic drawbacks of higher carbon pricing, thereby fostering cleaner production while aligning government objectives with industrial strategies.

4. Conclusions

This research advances the understanding of environmental policy design for water-intensive industries by combining cap-and-trade with water treatment subsidies in a unified framework. The results highlight the importance of synergistic policy instruments that address the interconnected challenges of production, water treatment, and carbon emissions. Ultimately, achieving sustainability in resource-intensive sectors requires innovative, adaptive frameworks that balance economic viability with environmental responsibility.

This study acknowledges certain limitations. The analysis relies on simplified assumptions and limited datasets, which may restrict generalizability to other industries or more complex contexts. Long-term policy effects, social and cultural responses, and uncertainties in producer behavior were not

incorporated into the model. Future research could address these limitations by integrating dynamic regulatory mechanisms, such as adaptive carbon taxes or flexible subsidy schemes that evolve in response to observed outcomes. Considering uncertainty in water treatment costs and technological change would further strengthen policy recommendations.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

All authors have had equal roles and contributions to the article.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

References

Jamali, M.-B., & Rasti-Barzoki, M. (2022). A game-theoretic approach for examining government support strategies and licensing contracts in an electricity supply chain with technology spillover: A case study of Iran. *Energy*, *242*, 122919. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122919

Norang, A., Eghbali, M. A., & Hajian, A. (2010, January). Supply chain analysis model based on system dynamics approach: a case of Iranian bicycle manufacturer. In *2010 International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM)* (Vol. 3, pp. 1481-1485). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICLSIM.2010.5461214

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۴/ دوره ۵/ شماره ۲/ صفحه ۱-۱۶

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

DOI: 10.22034/sep.2025.2049011.1245

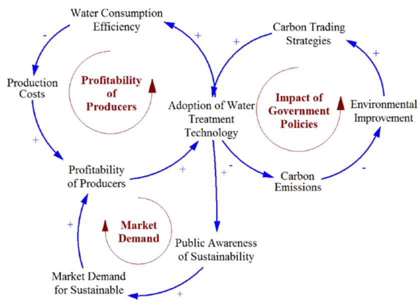
ارزیابی فناوری تصفیه آب در صنایع آب‌بر تحت استراتژی تجارت انتشار کربن دولت: یک رویکرد نظریه بازی

محمدباقر جمالی [1]*، محمدعلی اقبالی [2]

[1]استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

[2]استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی کامپیوتر و صنایع، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- بررسی اثرات یارانه دولتی بر مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم شامل میزان تولید، انتشار کربن و هزینه‌ها.
- بررسی سیاست‌های مؤثر برای کاهش ردپای کربن و بهبود عملکرد زیست‌محیطی صنایع.
- تحلیل تصمیم‌گیری صنایع آب‌بر تحت تأثیر مداخله دولتی.

چکیده

صنایع آب‌بر مانند فولاد، با ردپای کربنی قابل‌توجه در مراحل تولید و فرآیندهای تصفیه آب، سهم عمده‌ای در آلودگی محیط‌زیست دارند. این مسأله باعث شده تا دولت‌ها به تدوین سیاست‌ها و سازوکارهایی برای کاهش انتشار کربن در این صنایع بپردازند. یکی از این سیاست‌ها، تجارت کربن است؛ مکانیسمی که در آن به هر شرکت سهمیه مشخصی از انتشار کربن اختصاص داده می‌شود. شرکت‌هایی که از این سهمیه فراتر روند، با پرداخت جریمه مواجه می‌شوند و آن‌هایی که میزان انتشار کمتری دارند، می‌توانند سهمیه اضافی خود را به دیگران بفروشند. در مقاله حاضر، از یک مدل بازی استکلبرگ استفاده شده است که در آن دولت به‌عنوان بازیکن رهبر و تولیدکنندگان به‌عنوان بازیکنان پیرو نقش‌آفرینی می‌کنند. با به‌کارگیری نظریه بازی، اثرات یارانه‌های دولتی بر مقادیر تعادلی متغیرهای تصمیم شامل میزان تولید، انتشار کربن، و هزینه‌ها بررسی‌شده است. نتایج این تحلیل می‌تواند به دولت‌ها و تولیدکنندگان در تدوین سیاست‌های مؤثر برای کاهش ردپای کربنی و بهبود عملکرد زیست‌محیطی صنایع کمک کند. این پژوهش با ارائه بینش‌های کاربردی در زمینه تعاملات اقتصادی و زیست‌محیطی، نقش مهمی در درک تأثیر سیاست‌های دولتی بر تصمیم‌گیری در صنایع آب‌بر ایفا می‌کند.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

ارائه برخط: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

*نویسنده مسئول:

mb.jamali@sutech.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

تجارت کربن

صنایع آب‌بر

آلودگی محیط‌زیست

مدل استکلبرگ

نظریه بازی

۲۱۹۵-۲۵۳۸/© ۲۰۲۶ نویسندگان. منتشرشده توسط دانشگاه ایوان‌کی. این یک مقاله با دسترسی آزاد تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) است.

۱- مقدمه

با توسعه‌ی اقتصادی و گسترش صنایع، زندگی انسان‌ها نیز رشد پیداکرده است. هرچند در حین این رشد، آسیب‌های مخربی به محیط‌زیست وارده شده است. به همین خاطر، رشد اقتصادی و مصرف انرژی از دلایل اصلی مشکلات محیط زیستی به شمار می‌آیند (Waheed et al., 2019). فرایند تولید و مصرف انرژی، میزان قابل‌توجهی از کربن را تولید می‌کند و افزایش انتشار آن باعث ایجاد مشکلات جدی چون اثر گلخانه‌ای می‌شود (Ding et al., 2016).

رشد اقتصادی باعث افزایش فعالیت‌های صنعتی شده است که درنتیجه‌ی آن میزان تولید جهانی کربن را افزایش‌یافته است اما سهم کشورها در این تولید متفاوت است. میزان نیاز صنعتی، حمل‌ونقل و شهرنشینی در کشورهای درحال‌توسعه شدیدتر و درنتیجه آلودگی ناشی از آن‌ها بیشتر است (Shi et al., 2022; Waheed et al., 2019). علاوه بر این، تخلیه‌ی زباله‌ها و فاضلاب صنایع در آب‌ها منجر به آلودگی منابع آبی می‌شوند (Almonti et al., 2021) که در کشورهای درحال‌توسعه پسماند ناشی از فعالیت‌های صنعتی به‌جای تصفیه بیشتر دور ریخته می‌شود و این پسماند به‌طور قابل‌توجهی منابع آبی در دسترس را آلوده می‌کنند (Badar et al., 2024). با افزایش آگاهی جهانی درباره‌ی اثرات مخرب این‌گونه فعالیت‌ها بر محیط‌زیست، تمایل انسان‌ها برای خرید و استفاده از محصولاتی بیشتر شده است که با صرفه‌جویی در مصرف انرژی و آب و طی فرایندی با آلایندگی پایین‌تر تولید می‌شوند. این عامل به نیروی محرکه‌ای تولیدکنندگان برای کاهش مصرف و تصفیه آب، تبدیل‌شده است. اگرچه فرآیند تصفیه فاضلاب آلودگی آب را کاهش می‌دهد اما این فرآیند انرژی بر است و در طی آن مقادیر قابل‌توجهی گاز کربن دی‌اکسید تولید می‌شود (Ali et al., 2024).

به علت اثر مخرب گازهای گلخانه‌ای به‌خصوص کربن‌دی‌اکسیدی، دولت‌ها و کسب‌وکارها نیاز به کاهش کربن را احساس کرده‌اند. درنتیجه، بسیاری از کشورها طرح‌هایی را برای کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و تشویق کسب‌وکارها به تمرکز بر مسائل زیست‌محیطی پیشنهاد کرده‌اند (Li et al., 2016; Zhou et al., 2016).

اکنون‌که اتخاذ یک استراتژی مؤثر و ایجاد یک مکانیزم صحیح برای کاهش تأثیر گرمایش زمین بر فعالیت‌های انسانی به یک وظیفه مهم برای دولت‌ها در سراسر جهان تبدیل‌شده است، بسیاری از مناطق و کشورها سیاست‌ها و مقررات مربوط به کاهش کربن، مانند تجارت و مالیات بر کربن را تعبیه و اعمال کرده‌اند. سیاست‌های تجارت کربن از مؤثرترین راهکارهای کنترل انتشار کربن دی‌اکسید به شمار می‌آید (Giarola et al., 2012; Zhang & Xu, 2013) ، که به‌طور متوالی در سطح جهانی به این منظور پیشنهاد می‌شود (Sun et al., 2020). استراتژی تجارت کربن یک مکانیزم انعطاف‌پذیر است که مقررات دولتی و انگیزه‌ی بازار را با یکدیگر ادغام می‌کند. تحت این سیستم برای تولیدکنندگان یک مقدار از پیش تعیین‌شده‌ی انتشار کربن موسوم به سقف تولید کربن تعیین می‌شود (Xu et al., 2017). درصورتی‌که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تولیدکنندگان کمتر از سهمیه تخصیصی باقی بماند، آن‌ها می‌توانند سهمیه کربن مازاد را در بازار مختص به خود بفروشند ولی اگر میزان کربن تولیدی آن‌ها از سقفشان فراتر رفت باید سهمیه‌های اضافی از طریق بازار تهیه کنند (Cao et al., 2019; He et al., 2023; Yang et al., 2017). قیمت سهمیه‌های کربن خریدوفروش شده توسط بازار تعیین می‌شود (Wang & Wang, 2015).

تحت تأثیر مقررات اعمالی از سوی دولت‌ها و نیز تقاضای بازار، تولیدکنندگان با چالش‌هایی در زمینه عملیات‌های تولیدی خود روبه‌رو می‌شود که برای مقابله با آن استراتژی‌های متعددی مانند توسعه‌ی فناوری‌هایی برای کاهش میزان انتشار کربن به کار می‌گیرند که هزینه‌های بیشتری برای آن‌ها به دنبال دارد (Mao et al., 2017). دولت‌ها برای تشویق تولیدکنندگان به استفاده از فناوری‌های تصفیه آب به آن‌ها یارانه پرداخت می‌کرده و برای جلوگیری از تولید بی‌رویه‌ی کربن دی‌اکسید مکانیزم تجارت کربن را اجرا می‌کنند. در این مقاله تعاملات بین دولت و تولیدکنندگان بررسی‌شده و به سؤالات زیر پاسخ داده می‌شود:

۱) چه میزان یارانه باید پرداخت شود؟ میزان سود دولت با پرداخت این مقدار یارانه چه قدر خواهد بود؟

۲) میزان تولید کربن برای تولیدکننده چه میزان باشد تا سود او بیشترین مقدار شود؟
۳) قیمت فروش هر واحد محصول باید چه مقدار باشد تا سود تولیدکننده بیشترین مقدار باشد؟
۴) سطح تلاش (ارتقای فناوری) برای تصفیه‌ی آب توسط تولیدکننده چه مقدار تعیین می‌شود؟

این مقاله با تمرکز بر تعاملات بین دولت و تولیدکنندگان، به‌طور هم‌زمان تأثیر دو مکانیزم تجارت کربن و یارانه‌های تصفیه آب را بررسی کرده و برای نخستین بار مدلی تحلیلی ارائه می‌دهد که سطح بهینه انتشار کربن، ارتقای فناوری، قیمت‌گذاری محصولات و یارانه دولتی را برای حداکثرسازی سود هر دو طرف تعیین می‌کند. این پژوهش با تحلیل دقیق تصمیمات تولیدکنندگان و ارائه سیاست‌های بهینه برای دولت، راهکاری نوآورانه برای مدیریت پایدار منابع و کاهش آلودگی محیط زیستی ارائه می‌دهد.

در ادامه، مقاله به این صورت سازمان‌دهی شده است: بخش دوم به‌مرور ادبیات مرتبط با تجارت کربن، تصفیه آب و یارانه‌های دولتی اختصاص دارد. در بخش سوم، مدل‌سازی تعاملات بین دولت و تولیدکنندگان و تصمیم‌گیری‌های بهینه ارائه می‌شود. بخش چهارم، مثال عددی و تحلیل حساسیت را ارائه داده و نتایج عملی مدل را بررسی می‌کند. نهایتاً، در بخش پنجم، نتایج کلیدی تحقیق و پیشنهادات سیاستی برای بهبود مدیریت زیست‌محیطی ارائه شده است.

۲- مرور ادبیات موضوع

این مقاله به تحقیق درباره‌ی فعالیت‌های تصفیه‌ی آب صنایع تولیدی و مداخله‌ی دولت در راستای افزایش صرفه‌جویی در منابع و کاهش آلودگی‌های آب‌وهوا می‌پردازد. ادبیات مربوطه به‌تفصیل در این بخش بررسی خواهد شد. هر تولیدکننده هنگام تصمیم‌گیری درمورد میزان تولید خود با توجه به قوانین تجارت کربن سه گزینه خواهد داشت.

تصفیه آب در صنایع تولیدی و مداخله دولت برای حفاظت از منابع و کاهش آلودگی آب‌وهوا بسیار مهم است. امروزه، استفاده از آب صنعتی قابل‌توجه است و مدیریت آن می‌تواند منجر به مزایای قابل‌توجهی زیست‌محیطی و اقتصادی شود. تصفیه آب مؤثر و اقدامات سیاست می‌تواند به صنایع کمک کند تا مصرف آب را کاهش دهند، فاضلاب را بازیافت کنند و آلودگی را به حداقل برسانند. این رویکرد نه‌تنها باعث صرفه‌جویی در آب می‌شود بلکه هزینه‌های عملیاتی و تأثیرات زیست‌محیطی را نیز کاهش می‌دهد. بخش‌های زیر استراتژی‌ها و مداخله‌های مختلف را برای دست‌یابی به این اهداف بررسی می‌کند.

صنایع پرمصرف آب بخش‌هایی هستند که به‌طور قابل‌توجهی به حجم زیادی از آب برای عملیات خود متکی هستند و اغلب منجر به چالش‌های زیست‌محیطی و تخلیه منابع می‌شوند. ادغام شیوه‌های پایدار و فن‌آوری‌های نوآورانه برای افزایش بهره‌وری آب و کاهش اثرات منفی بر اکوسیستم بسیار مهم است.

صنایع فعال در حوزه پالایش شیمیایی و نفت از بالاترین مصرف‌کنندگان آب هستند و از آن برای خنک‌سازی، پردازش و تمیز کردن استفاده می‌کنند. پیاده‌سازی سیستم‌های حلقه بسته می‌تواند استفاده مجدد آب را افزایش داده و پسماند را به حداقل برساند (Karkou et al., 2024). اتخاذ شیوه‌های دایره‌ای آب، مانند بازیافت و استفاده مجدد از آب در فرآیندهای صنعتی، می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی مصرف کلی آب را کاهش دهد. پیگیری رشد اقتصادی در صنایع آب‌بر اغلب با نیاز به حفاظت از آب در تعارض است. متعادل کردن این خواسته‌ها بسیار مهم است، به‌ویژه در مناطقی که با کمبود آب و تأثیرات تغییرات آب و هوایی مواجه هستند (Kumar & Thakur, 2024).

در رابطه با مقالات اخیر درزمینه فناوری‌های نوین تصفیه آب می‌توان به پژوهش پیرا و شکوفه (Shokufeh Pira, 2022) پرداخت که در آن آن‌ها مروری بر فناوری‌های نوین در سنتز نانو ساختارهای مورداستفاده در تصفیه پساب‌ها را موردبررسی قرار دادند. بهروزی نژاد (Behrouzi Nejad, 2024) به بهبود بهره‌وری در تصفیه فاضلاب شهری بر پایه سیستم‌های پیشرفته فیلتراسیون دینامیک متغیر پرداختند. آن‌ها فناوری‌های نوین را برای تصفیه آب موردبررسی قرار دادند. همچنین، کامیاب (Kamyab, 2024) مروری بر راهکارهای مؤثر نانوسیالات در جهت بهبود و بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب داشته‌اند.

در حالی که تمرکز بر صنایع پرمصرف آب، نیاز به مدیریت کارآمد و شیوه‌های نوآورانه را برجسته می‌کند، توجه به پیامدهای گسترده‌تر استفاده از آب صنعتی بر پایداری زیست‌محیطی و در دسترس بودن منابع نیز ضروری است. از این‌رو، تقاطع صنایع پرمصرف آب و استراتژی‌های دادوستد کربن فرصتی منحصربه‌فرد برای افزایش بهره‌وری آب و کاهش انتشار کربن ارائه می‌دهد. با ادغام این دو چارچوب، صنایع می‌توانند استفاده از منابع را در عین رعایت مقررات زیست‌محیطی بهینه کنند. تحقیقات زیر جنبه‌های کلیدی این رابطه را شرح می‌دهد.

سان و همکاران (۲۰۲۳) در مقاله خود نشان دادند که مداخله دولت، مانند اجرای قیمت‌گذاری آب، مالیات بر منابع آب و یارانه‌های کاهش انتشار کربن، می‌تواند به‌طور مؤثر مصرف آب صنعتی و تخلیه فاضلاب را تنظیم کند. این سیاست‌ها صنایع تولیدی را به سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه تشویق و منجر به صرفه‌جویی در منابع و کاهش آلودگی آب‌وهوا می‌شود. آن‌ها در این تحقیق بر اهمیت حفظ قیمت مناسب آب و نرخ مالیات برای تعادل منافع اقتصادی و زیست‌محیطی، و درنهایت ترویج شیوه‌های پایدار در شرکت‌های صنعتی تأکید کردند (Sun et al., 2023).

استانکوو (۲۰۲۴) بر اهمیت تصفیه آب در صنایع تولیدی برای کاهش استخراج آب شیرین و به حداقل رساندن تخلیه فاضلاب تأکید کرد. نتایج تحقیق وی نشان داد که مداخله دولت می‌تواند نقش مهمی در ترویج مقررات و انگیزه‌های صنایع برای اتخاذ فن‌آوری‌ها و شیوه‌های صرفه‌جویی در مصرف آب داشته باشد و درنهایت منجر به افزایش بهره‌وری منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی شود (Stankov, 2024).

بورداک و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی سیستم تجارت حق‌آب در استرالیا به‌عنوان ابزاری برای تخصیص مجدد منابع آب در مناطق کم‌آب پرداختند. آن‌ها با تحلیل ساختار بازار حق‌آب، سقف تخصیص آب، و مصاحبه‌های اکتشافی با کارشناسان، مشکلات بالقوه این سیستم در استفاده پایدار از آب بررسی کردند (Burdack et al., 2014).

ژائو و همکاران (۲۰۲۴) صنایع پرمصرف آب، به‌ویژه تولید نساجی، پوشاک و محصولات کاغذی، را به‌عنوان کاندیداهای کلیدی برای کاهش مقیاس تولید استراتژیک در چارچوب سازوکار تجارت کربن شناسایی کردند. آن‌ها با ادغام مکانیسم‌های تجارت کربن با استراتژی‌های مدیریت آب، یک چارچوب برنامه‌ریزی چند هدفه را باهدف بهینه‌سازی انتشار کربن و کارایی آب ارائه دادند (Zhou et al., 2024).

چن و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که اجرای مقررات CAT به‌طور مؤثر کاهش مصرف آب را افزایش می‌دهد و عملکرد عملیاتی زنجیره تأمین صرفه‌جویی در مصرف آب را بهبود می‌بخشد. آن‌ها دریافتند که کاربرد همزمان راهبردهای تنظیم و هماهنگی CAT به‌عنوان مؤثرترین رویکرد برای مدیریت منابع آب در صنایع آب‌بر است (Chen et al., 2019).

آقایی و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از یک مدل مبتنی بر عامل، اثرات اجتماعی و اقتصادی انتقال آب به صنایع آب‌بر را با در نظرگرفتن سیاست سقف و تجارت در دشت رفسنجان بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیب این دو سیاست می‌تواند، اقدامات صنایع را تسهیل، هزینه‌های اقتصادی آن‌ها و دولت را کاهش و نتایج مطلوب‌تری در ابعاد اجتماعی و اقتصادی به همراه داشته باشد (Aghaie et al., 2020).

یوجای و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی تأثیر فناوری‌های مبتنی صرفه‌جویی در مصرف آب بر کاهش تقاضای آب در صنایع پرمصرف آب و انرژی تحت گذار به کربن خنثی پرداختند. یافته‌ها نشان داد که فناوری‌های مبتنی بر صرفه‌جویی می‌توانند مصرف آب در صنایعی مانند فولاد، آمونیاک مصنوعی، اتیلن و متانول را تا سال ۲۰۵۰ به میزان قابل‌توجهی کاهش دهند. همچنین، فناوری‌های پیشرفته در صنایعی چون کاغذسازی و نساجی بهبودهای چشمگیری در بهره‌وری مصرف آب ایجاد می‌کنند و نشان می‌دهند که این فناوری‌ها نقش کلیدی در کاهش تنش آبی و تحول صنعتی دارند (Yu-Jie et al., 2024).

باوجود تحقیقات گسترده در زمینه کاهش انتشار کربن و توسعه مکانیسم‌های تجاری مانند تجارت کربن، شکاف‌های تحقیقاتی همچنان وجود دارند که در این مقاله به آن‌ها پرداخته شده است. یکی از این شکاف‌ها، عدم ارزیابی دقیق اثرات ترکیبی یارانه‌های دولتی و مکانیزم‌های بازار در تعیین تصمیمات بهینه تولیدکنندگان و تأثیر آن بر سودآوری و پایداری زیست‌محیطی است. علاوه بر این، در بسیاری از مطالعات، تأثیر فناوری‌های

نوین تصفیه آب بر کاهش همزمان مصرف انرژی و انتشار کربن موردبررسی جامع قرار نگرفته است. این مقاله با اتخاذ رویکرد نظریه‌بازی و مدل‌سازی تعاملات بین دولت و تولیدکنندگان، به ارائه راهکارهایی برای بهبود این مکانیزم‌ها می‌پردازد و تلاش می‌کند تا رویکردی جامع‌تر برای تعادل بین سودآوری اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی ارائه دهد. نوآوری اصلی این تحقیق در ترکیب سیاست‌های تجارت کربن با یارانه‌های دولتی برای کاهش هزینه‌های تولیدکنندگان و افزایش انگیزه آن‌ها در ارتقای فناوری برای تصفیه‌ی آب نهفته است.

۳- نمادها

علائم و نمادهای استفاده‌شده در این پژوهش مطابق جدول **۱** است.

۴- تعریف مسئله

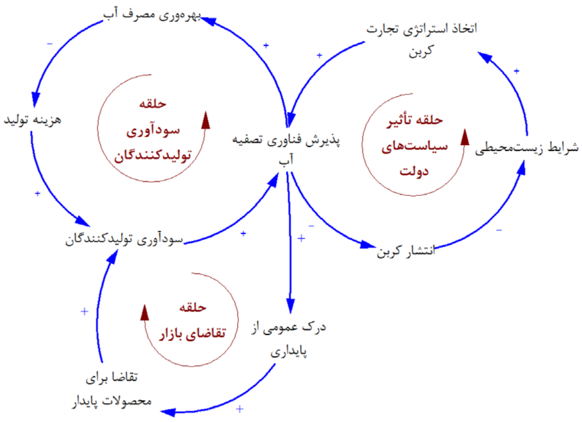
هدف مقاله حاضر ارزیابی فناوری تصفیه آب در صنایع آب‌بر تحت استراتژی تجارت انتشار کربن دولت با رویکرد نظریه بازی است. تحلیل پدیده‌های پویا با در نظر گرفتن دیدگاه سیستمی و افق‌های زمانی مناسب، ذهنیت سیاست‌گذاران و مدیران را در مسیری صحیح جهت‌دهی می‌کند (Norang et al., 2010). در این بخش قبل از تشریح مسئله در قالب نظریه بازی، ساختار بازخوردی پدیده حاضر را تشریح می‌کنیم. ازاین‌رو سعی شده است با یک نمودار علت و معلولی به شکلی جامع، تعاملات میان سیاست‌های دولتی، رفتار مصرف‌کنندگان، و سودآوری تولیدکنندگان در مسیر تحقق پایداری و توسعه تجارت سبز نشان داده شود. همان‌طور که در شکل **۱** نشان داده‌شده است، این پدیده شامل سه حلقه بازخوردی مثبت است که هرکدام نقش ویژه‌ای در ارتقای پایداری دارند.

در **حلقه اول**، سیاست‌های دولت مانند تدوین و اجرای استراتژی‌های تجارت سبز و اتخاذ قوانین حامی محیط‌زیست، مستقیماً بر بهبود شرایط زیست‌محیطی و اقتصادی اثر می‌گذارد. این سیاست‌ها تولیدکنندگان را تشویق می‌کند تا به سمت روش‌های تولید پایدارتر حرکت کنند. **حلقه دوم**، بر سودآوری تولیدکنندگان تمرکز دارد، به این معنا که با افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات پایدار، تولیدکنندگان انگیزه بیشتری برای تولید چنین محصولاتی پیداکرده و درنتیجه به سودآوری بیشتری دست می‌یابند. این سودآوری مجدداً توانایی آن‌ها برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌ها و فرآیندهای سبزتر را افزایش می‌دهد.

جدول ۱. علائم بکار رفته در فرآیند مدل‌سازی

Table 1. Symbols used in the modeling process

اندیس‌ها	
m	تولیدکننده
g	دولت
پارامترها	
α	تقاضای خالص بازار
β	ضریب حساسیت به قیمت محصول
λ	ضریب تأثیر ارتقای فناوری تصفیه آب برای کنترل میزان کربن بر روی تقاضا
κ	ضریب هزینه میزان ارتقای فناوری برای تصفیه آب
t_0	سطح اولیه فناوری جهت کنترل کربن به هنگام تصفیه آب
F	هزینه ثابت برای تصفیه آب و جلوگیری از انتشار کربن
c	هزینه‌ی تولید به ازای هر واحد محصول
E_m	حد مجاز تعیین‌شده برای میزان تولید کربن
e	میزان انتشار کربن به ازای تولید هر واحد محصول
p_j	میزان تشویق یا جریمه
متغیرها	
p_m	قیمت فروش تولیدکننده
t_1	سطح تلاش (ارتقای فناوری) برای تصفیه‌ی آب
s	میزان یارانه‌ی پرداختی دولت



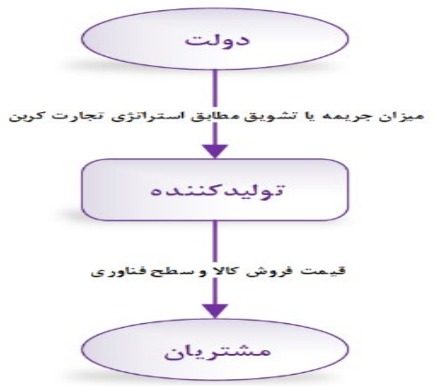
شکل ۱. ساختار بازخوردی با تأکید بر ابعاد توسعه پایدار.

Figure 1. Feedback structure with emphasis on sustainable development dimensions.

حلقه سوم به تقاضای بازار و رفتار مصرف‌کنندگان می‌پردازد. آگاهی عمومی از مسائل زیست‌محیطی و اهمیت محصولات پایدار به‌مرور در میان مصرف‌کنندگان افزایش می‌یابد، و این آگاهی باعث رشد تقاضا برای محصولات دوستدار محیط‌زیست می‌شود. درنتیجه، تولیدکنندگان تحت‌فشار رقابتی بیشتری قرار می‌گیرند تا به نیازهای بازار پاسخ دهند و محصولات پایدار بیشتری ارائه کنند. این سه حلقه بازخوردی به‌صورت هم‌افزا عمل کرده و تقویت متقابل میان دولت، تولیدکنندگان، و مصرف‌کنندگان را تضمین می‌کنند، به‌طوری‌که هر گام مثبت در یک بخش، بخش‌های دیگر را نیز بهبود می‌بخشد. این مدل به‌وضوح اهمیت سیاست‌گذاری‌های مناسب، نقش آگاهی و آموزش مصرف‌کنندگان، و تعهد تولیدکنندگان به پایداری را نشان می‌دهد. درنهایت، نتیجه این تعاملات منجر به بهبود شرایط زیست‌محیطی، افزایش رقابت‌پذیری در بازارهای پایدار، و حرکت به سمت اقتصادی سبزتر و مقاوم‌تر می‌شود. این چرخه‌های بازخوردی به‌عنوان یک نقشه راه می‌توانند در تدوین استراتژی‌های پایدار در سطوح ملی و بین‌المللی مورداستفاده قرار گیرند.

با توجه به تشریح پدیده پویا با رویکرد تحلیل حلقه‌های بازخوردی مهم، می‌توان با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی کمی، نتایج قابل‌توجهی را به دست آورد. بر این اساس، با رویکرد نظریه بازی استکلبرگ و با در نظر گرفتن دولت به‌عنوان بازیکن رهبر و تولیدکننده به‌عنوان بازیکن پیرو و استراتژی‌های مرتبط با هر بازیکن برای بیشینه کردن سود خود، به دنبال بهترین راه‌حل و تصمیمات تعادلی در این مسئله هستیم. ارتباط بین این بازیکنان و متغیرهای تصمیم هر بازیکن در شکل **۲** نمایش داده‌شده است. بنابراین، در مسئله‌ی موردبررسی دولت به‌عنوان رهبر این بازی نیاز است تا در مورد میزان جریمه یا تشویق مطابق با استراتژیِ تجارت انتشار کربن تصمیم‌گیری کند و همچنین تولیدکننده در مورد قیمت فروش محصول و سطح تلاش (ارتقای فناوری) برای تصفیه‌ی آب تصمیم‌گیری کند.

در این بازی ابتدا دولت برای سیاست اتخاذی یک سقف و حد جریمه و تشویق تعیین می‌کند و سپس بر اساس این فرضیات تولیدکنندگان میزان تولید محصول خود را با در نظر گرفتن تقاضا تعیین می‌کنند. میزان تولیدی مقادیری سود یا زیان برای دولت و تولیدکنندگان در بردارد و منجر به تولید مقدار مشخصی از کربن دی‌اکسید می‌شود.



شکل ۲. ساختار حاکم بر بازی در مسئله تحقیق.

Figure 2. The structure governing the game in the research problem.

در ادامه دولت با توجه به میزان سود خود یارانه‌ای برای تصفیه‌ی آب تخصیص می‌دهد و میزان سود دولت مجدد محاسبه می‌شود.

میزان تولید هر تولیدکننده از محصولاتش که تقاضای تولیدکننده نامیده می‌شود به عواملی چون تقاضای خالص بازار، سطح و میزان تصفیه‌ی آب و میزان تولید کربن به ازای هر واحد محصول وابسته است و طبق رابطه ۱ حساب می‌شود. میزان انتشار کربن به هنگام تصفیه آب به سطح ارتقای فناوری وابسته است و مطابق رابطه ۲ این رابطه به‌صورت درجه دوم در نظر گرفته‌شده است و میزانی از آن به‌صورت هزینه ثابت می‌باشد.

مقدار کل کربن تولیدی با درنظر گرفتن مقدار تولید محصول و میزان تولید کربن به ازای هر واحد محصول پس از تصفیه آب به دست می‌آید و طبق رابطه ۳ محاسبه می‌شود. سود تولیدکننده از درآمد به ازای هر واحد محصول منهای هزینه‌ی تصفیه و میزان سود یا زیان حاصل از تجارت کربن حساب می‌شود که در رابطه ۴ نشان داده شده است. سود دولت از احتساب هزینه یارانه و سود یا زیان حاصل از تجارت کربن طبق رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$D_m(p_m,t_1)=\alpha-\beta(p_m-s)+\lambda t_1 \quad (۱)$$

$$CO(t_1)=\left(\kappa\,(t_1-t_0)^2/2\right)+f \quad (۲)$$

$$T(t_1)=e(1-t_1)\,D_m(p_m,t_1) \quad (۳)$$

$$\pi_m(p_m,t_1)=(p_m-c)D_m(p_m,t_1)-(T(t_1)-E_m)p_j-CO(t_1) \quad (۴)$$

$$\pi_g(s)=p_j(T(t_1)-E_m)-sD_m(p_m,t_1) \quad (۵)$$

۵- نتایج و تحلیل حساسیت

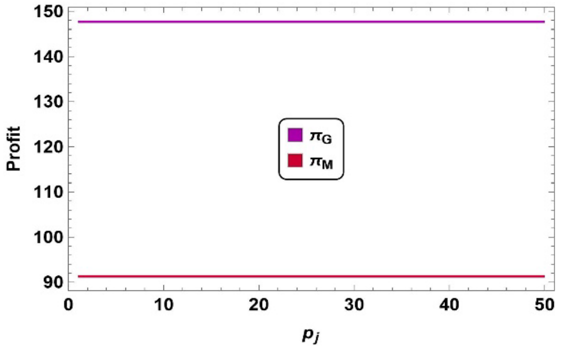
با در نظر گرفتن مقادیر زیر به‌عنوان مقادیر پارامترها، مقادیرتعادلی برای روابط و متغیرها محاسبه شده است. این مقادیر بر اساس پژوهش‌های پیشین به‌طور نمونه (Jamali & Rasti-Barzoki, 2022; Safarzadeh & Rasti-Barzoki, 2019; Sinayi & Rasti-Barzoki, 2018) ارائه‌شده است:

$$(\alpha = 100, \beta = 3.5, \lambda = 2, \kappa = 3000, t_0 = 0.1, f = 10, e = 12, c = 8, E_m = 20, p_j = 2)$$

شکل ۳ تأثیر هزینه‌ی جریمه یا تشویق بر سود تولیدکننده و دولت را نشان می‌دهد. بر اساس نمودار، هزینه‌ی جریمه یا تشویق به‌گونه‌ای تعیین‌شده که تأثیر آن بر تابع سود تولیدکننده تقریباً ناچیز است و در سود دولت نیز تغییری ایجاد نمی‌کند. این بدان معناست که این هزینه‌ها در مدل طراحی‌شده به حدی کم در نظر گرفته شده‌اند که در معادلات بهینه‌سازی سود، نقش قابل‌توجهی ندارند.

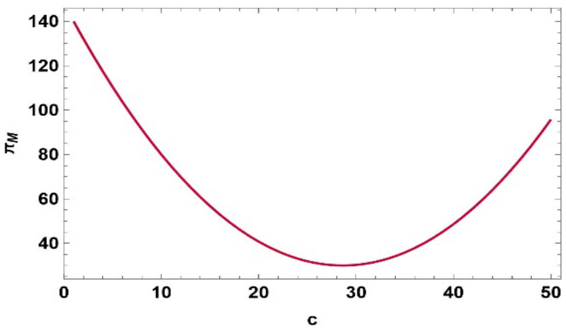
سود دولت در سطحی ثابت باقی می‌ماند و هیچ تغییری را با تغییر مقادیر هزینه‌ی جریمه یا تشویق نشان نمی‌دهد. از سوی دیگر، برای سود تولیدکننده به‌دلیل کوچک بودن این هزینه‌ها، تأثیر محسوس و قابل‌ملاحظه‌ای بر مقدار آن دیده نمی‌شود. درنتیجه، این نوع هزینه‌ها در تعیین رفتارهای اقتصادی تولیدکننده و دولت، اثری محدود دارند.

بینش مدیریتی ۱: در صنایع مرتبط با سیاست‌های جریمه و تشویق (مانند صنایع آب‌بر)، اگر هزینه‌های جریمه یا تشویق به‌گونه‌ای تعیین شوند که تأثیر چشمگیری بر رفتار تولیدکننده نداشته باشند، اهداف سیاست‌گذاری محقق نخواهند شد. مدیران دولتی و سیاست‌گذاران باید در تعیین میزان این هزینه‌ها تجدیدنظر کنند تا اثربخشی سیاست‌ها افزایش یابد. برای تولیدکنندگان نیز، چنین سیاست‌هایی فرصتی فراهم می‌کند تا بدون نگرانی از افزایش هزینه‌ها، بر بهره‌وری و کاهش هزینه‌های عملیاتی تمرکز کنند. پیشنهاد می‌شود در بازنگری سیاست‌ها، به‌جای تعیین هزینه‌های ناچیز، مکانیزم‌هایی طراحی شوند که تأثیر واقعی بر رفتار تولیدکنندگان داشته باشند، مانند جریمه‌های متناسب با میزان مصرف منابع یا تشویق‌های قابل‌توجه برای استفاده از فناوری‌های سازگار با محیط‌زیست.



شکل ۳. تأثیر هزینه جریمه و تشویق بر سود.

Figure 3. The impact of penalty and incentive costs on profits.



شکل ۴. تأثیر هزینه تولید بر قیمت نهایی تولید.

Figure 4. The impact of production cost on the final price of production.

در شکل ۴ روند سود تولیدکننده را در ارتباط با هزینه‌ی تولید هر واحد محصول نشان می‌دهد. با افزایش اولیه هزینه تولید هر واحد محصول، سود تولیدکننده به دلیل کاهش قیمت نهایی به‌طور چشمگیری افت می‌کند. این روند نزولی تا نقطه‌ای ادامه می‌یابد که سود به صفر می‌رسد. در این مرحله، هزینه‌های تولید تماماً توسط درآمد پوشش داده‌شده و تولیدکننده سودی کسب نمی‌کند. با این حال، پس از این نقطه، افزایش بیشتر در هزینه تولید باعث افزایش قیمت نهایی محصول می‌شود. این افزایش قیمت که احتمالاً ناشی از ارتقای کیفیت محصول یا پذیرش بهتر بازار است، باعث بهبود روند سوددهی می‌شود. به عبارتی، پس از عبور از نقطه حداقل، سود تولیدکننده به‌تدریج افزایش می‌یابد.

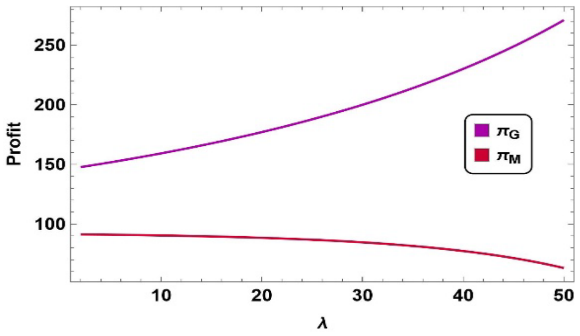
بینش مدیریتی ۲: در صنایع حساس به هزینه‌های تولید، مانند صنایع آب‌بر، مدیران باید استراتژی‌هایی را طراحی کنند که بتوانند تأثیر هزینه‌های تولید را

بهینه‌سازی کنند. افزایش اولیه در هزینه‌های تولید، اگرچه در کوتاه‌مدت سود را کاهش می‌دهد، اما در بلندمدت می‌تواند به افزایش سود منجر شود، به‌ویژه اگر با ارتقای کیفیت یا ایجاد ارزش‌افزوده همراه باشد. این نمودار نشان می‌دهد که مدیران باید نقطه تعادلی میان هزینه تولید و قیمت نهایی محصول را شناسایی کنند تا بتوانند بیشترین سود ممکن را به دست آورند. سرمایه‌گذاری در بهبود کیفیت یا فرآیندهای کارآمدتر می‌تواند به افزایش قیمت نهایی و سود کمک کند، اما نیاز به تحلیل دقیق بازار و رفتار مصرف‌کنندگان دارد. علاوه بر این، این روند تأکید می‌کند که استفاده از فناوری‌های بهینه و سازگار با محیط‌زیست می‌تواند به افزایش بازدهی و تقویت سودآوری بلندمدت منجر شود.

شکل **۵** تأثیر ضریب کربن بر سود تولیدکننده و سود دولت را نشان می‌دهد. با افزایش ضریب تأثیر کربن، سود تولیدکننده روند کاهشی پیدا می‌کند و درنهایت به صفر می‌رسد. این کاهش می‌تواند ناشی از هزینه‌های اضافی مرتبط با تولید پایدارتر، کاهش رقابت‌پذیری یا الزامات زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تر باشد. در مقابل، تأثیر ضریب کربن بر سود دولت کاملاً مثبت است و با افزایش λ، سود دولت به‌صورت صعودی رشد می‌کند. این رشد ممکن است ناشی از درآمدهای حاصل از مالیات‌های کربن، جریمه‌های زیست‌محیطی یا سیاست‌های تشویقی برای کاهش آلاینده‌ها باشد.

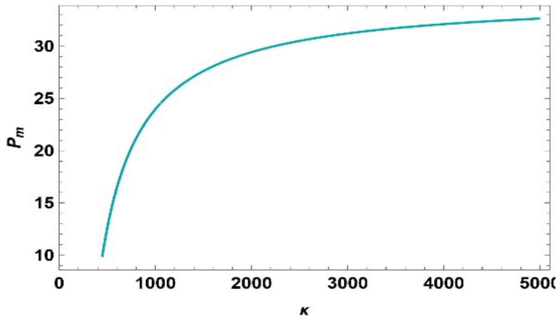
بینش مدیریتی ۳: در صنایعی که به‌شدت تحت تأثیر سیاست‌های کربنی قرار دارند، مانند صنایع آب‌بر و انرژی‌بر، مدیران باید استراتژی‌هایی اتخاذ کنند که اثرات منفی این سیاست‌ها بر سودآوری را به حداقل برسانند. استفاده از فناوری‌های پاک‌تر، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و سرمایه‌گذاری در کاهش ردپای کربنی می‌تواند به کاهش اثرات منفی ضریب کربن کمک کند. از سوی دیگر، سیاست‌گذاران باید به تعادل میان منافع دولت و تأثیرات بر تولیدکنندگان توجه داشته باشند. افزایش بیش‌ازحد مالیات‌های کربن یا هزینه‌های زیست‌محیطی ممکن است. به خروج تولیدکنندگان از بازار یا کاهش انگیزه برای سرمایه‌گذاری در صنایع منجر شود. برای تولیدکنندگان، حرکت به سمت تولیدات پایدار و کاهش کربن نه‌تنها راهی برای تطابق با سیاست‌هاست، بلکه می‌تواند فرصتی برای ایجاد مزیت رقابتی و جلب حمایت مصرف‌کنندگان و سرمایه‌گذاران باشد. این شکل نشان می‌دهد که تولیدکنندگان باید به‌طور فعال با دولت‌ها در تدوین سیاست‌های متعادل همکاری کنند تا از اثرات منفی شدید بر سودآوری جلوگیری شود.

با توجه به شکل **۶** هرچه ضریب تصفیه‌ی آب افزایش یابد، میزان آب تمیز در دست نیز بیشتر می‌شود و درنتیجه قیمت نهایی فروش که وابسته به میزان سطح فناوری تصفیه آب است نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۵. اثر ضریب تأثیر کربن بر سود.

Figure 5. The effect of carbon impact factor on profits.



شکل ۶. اثر ضریب تصفیه آب بر قیمت نهایی.

Figure 6. The effect of water purification coefficient on the final price.

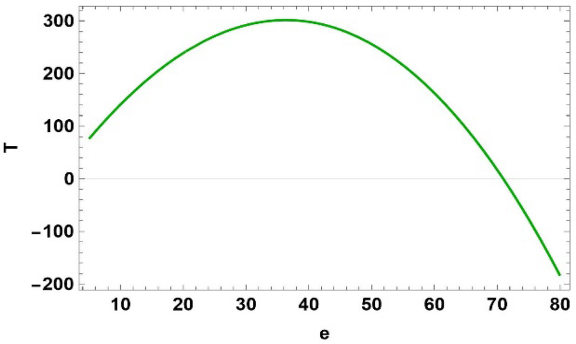
بینش مدیریتی ۴: در صنایع آب‌بر، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشرفته تصفیه آب یک استراتژی کلیدی برای افزایش سودآوری و مزیت رقابتی است. افزایش دسترسی به آب تمیز نه‌تنها کیفیت محصول را بهبود می‌بخشد، بلکه می‌تواند برند تولیدکننده را به‌عنوان حامی محیط‌زیست تقویت کند، که این امر به جذب مشتریان آگاه‌تر و وفادارتر منجر می‌شود. مدیران باید تحلیل دقیقی از تأثیر ضریب تصفیه بر هزینه‌ها و قیمت نهایی داشته باشند و اطمینان حاصل کنند که افزایش هزینه‌های اولیه برای پیاده‌سازی فناوری‌های پیشرفته، از طریق افزایش ارزش محصول و قیمت فروش، جبران خواهد شد.

همچنین، همکاری با دولت‌ها و سازمان‌های زیست‌محیطی برای دریافت مشوق‌ها یا کمک‌های مالی درزمینه ارتقای فناوری تصفیه آب می‌تواند به کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و افزایش سودآوری در بلندمدت کمک کند.

همان‌طور که در شکل **۷** مشاهده می‌شود، افزایش ضریب تولید کربن در ابتدا باعث افزایش میزان کل تولید کربن و درنتیجه افزایش هزینه‌های نهایی تولید می‌شود. این افزایش هزینه‌ها می‌تواند ناشی از پرداخت مالیات‌های کربن، جریمه‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های عملیاتی مرتبط با انتشار کربن باشد. با این حال، پس از یک مقدار مشخص از ضریب تولید کربن، این روند تغییر می‌کند و میزان کل تولید کربن و هزینه‌های نهایی کاهش می‌یابد. این تغییر ممکن است به دلیل اتخاذ اقدامات اصلاحی از سوی تولیدکنندگان، به‌کارگیری فناوری‌های کاهنده کربن یا کاهش بازدهی تولید در سطوح بالای ضریب کربن باشد. درنتیجه، پس از این نقطه بحرانی، تولیدکنندگان ممکن است کاهش انتشار کربن را به‌عنوان یک ضرورت اقتصادی و زیست‌محیطی در نظر بگیرند.

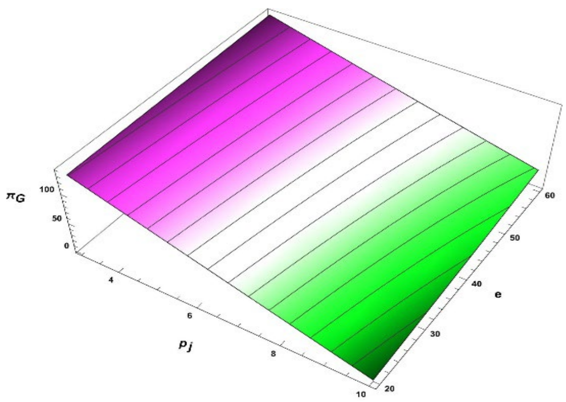
بینش مدیریتی ۵: شکل **۷** نشان می‌دهد که در صنایع وابسته به انرژی و منابع آب، کنترل و مدیریت ضریب تولید کربن از اهمیت بالایی برخوردار است .در مراحل اولیه افزایش ضریب کربن، هزینه‌های تولید ممکن است افزایش یابد، اما با عبور از نقطه بحرانی، بهینه‌سازی فناوری و مدیریت منابع می‌تواند روند هزینه‌ها را معکوس کند. مدیران باید بر اساس این تحلیل، اقدامات پیشگیرانه برای کنترل انتشار کربن و کاهش هزینه‌ها را در اولویت قرار دهند .سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سبز و پایدار، نه‌تنها به کاهش هزینه‌های مالیاتی و زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به بهبود عملکرد بلندمدت کسب‌وکار منجر شود. همچنین، همکاری با دولت‌ها و سازمان‌های زیست‌محیطی برای دریافت یارانه یا تشویق‌های مالی مرتبط با کاهش کربن می‌تواند به تسهیل این انتقال کمک کند. تولیدکنندگان باید به‌طور فعالانه این نقطه بحرانی را شناسایی و برنامه‌ریزی استراتژیک برای عبور از آن داشته باشند.

اثرات هم‌زمان میزان تشویق یا جریمه دولت (p_j) و میزان انتشار کربن به ازای تولید هر واحد محصول (e) بر روی تابع سود دولت در شکل **۸** قابل‌مشاهده است. همان‌طور که در شکل قابل‌مشاهده است با بهینه‌سازی سیاست‌های مالیاتی و تشویقی می‌تواند به افزایش سود دولت و کاهش آلودگی هم‌زمان منجر شود. دولت باید استراتژی‌های پویایی را بر اساس میزان انتشار کربن و اثرات اقتصادی بر صنایع تنظیم کند تا تعادل بین درآمد، پایداری محیط‌زیست، و رشد اقتصادی حفظ شود.



شکل ۷. اثر ضریب تولید کربن بر میزان کل انتشار تولیدشده.

Figure 7. The effect of the carbon production coefficient on the total amount of emissions produced.



شکل ۸. اثرات هم‌زمان میزان تشویق یا جریمه دولت و میزان انتشار کربن به ازای تولید هر واحد محصول.

Figure 8. Simultaneous effects of government incentives or penalties and carbon emissions per unit of output.

۶- نتیجه‌گیری

هرچند ازنظر زیست‌محیطی افزایش قابل‌توجه سطح فناوری تصفیه آب برای جلوگیری از تولید فاضلاب‌های خطرناک مطلوب است ولی ازنظر عملی این کار به دلیل ناچیز کردن سود تولیدکننده امکان‌پذیر نیست. بنابراین برای تولیدکننده تفاوت بین رعایت حد مجاز یا خرید

سهمیه‌ی اضافی وجود ندارد و هر دو گزینه سود مناسبی تأمین می‌کند. دولت به دنبال افزایش تأثیر کربن در تولید و درنتیجه افزایش ضریب آن است اما افزایش این ضریب به نفع تولیدکننده نیست و با آن مقابله خواهد کرد. گرچه به خاطر سیاست تجارت انتشار کربن افزایش تولید کربن در برای مقادیر تولید کم به‌صرفه ایست اما درصورتی‌که میزان تولید انبوه باشد، هزینه کردن برای خرید سهمیه‌ی کربن برای افزایش میزان تولید کربن در واحد صنعتی به نفع تولیدکننده نخواهد بود زیرا هزینه‌ی نهایی فروش را کاهش می‌دهد. پژوهش ما با ترکیب هم‌زمان سیاست تجارت کربن و یارانه تصفیه آب، رویکردی جامع‌تر ارائه می‌دهد که در سایر مطالعات کمتر به آن پرداخته‌شده است. برخلاف پژوهش‌های قبلی که عمدتاً بر یکی از این سیاست‌ها تمرکز داشته‌اند، این تحقیق تعامل بین این دو ابزار سیاستی را بررسی کرده و تأثیر هم‌زمان آن‌ها بر تصمیمات تولیدکننده و دولت را تحلیل می‌کند. این نوآوری، بینش‌های جدیدی درباره سیاست‌گذاری زیست‌محیطی ارائه می‌دهد که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های عملی نیز مفید باشد.

این تحقیق با محدودیت‌هایی مانند استفاده از داده‌های محدود و ساده‌سازی برخی پارامترهای محیطی مواجه بوده که ممکن است نتایج آن را برای تمامی صنایع به‌ویژه در شرایط پیچیده کمتر قابل‌تعمیم کند. همچنین، اثرات بلندمدت سیاست‌های زیست‌محیطی و واکنش‌های اجتماعی و فرهنگی به این سیاست‌ها موردتوجه قرار نگرفته است. به‌طور نمونه در نظر گرفتن نا اطمینانی در رفتار تولیدکننده یا تغییرات در هزینه‌های فناوری تصفیه آب می‌تواند بر تصمیمات سیاست‌گذاری تأثیر بگذارد. همچنین، راهکارهایی مانند تنظیم پویای مالیات و سوبسید بر اساس نتایج مشاهده‌شده از اجرای سیاست‌ها پیشنهادشده است تا کارایی مدل در شرایط واقعی افزایش یابد. برای تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود راهکارهای اقتصادی برای تشویق تولیدکنندگان به استفاده از فناوری‌های تصفیه آب و کاهش آلاینده‌ها بررسی شود و مدل‌هایی برای تعادل میان الزامات زیست‌محیطی و سودآوری اقتصادی توسعه یابد. تأثیر عوامل سیاسی یا اجتماعی بر تصمیمات دولت علاوه بر عوامل اقتصادی قابل در نظرگیری برای این پژوهش می‌باشد. ما تنها صنایعی که مصرف آب زیادی را دارند موردتوجه قرار داده‌ایم سایر صنایع و همچنین صنایع کوچک و متوسط نیز می‌تواند به‌عنوان هدف تحقیق با در نظرگیری ویژگی خاص هر صنعت برای مطالعات آتی در نظر گرفته شود. همچنین، تحلیل رفتار مصرف‌کنندگان نسبت به محصولات پایدار و تأثیر سیاست‌های منطقه‌ای انتشار کربن بر صنایع مختلف می‌تواند به غنای بیشتر تحقیقات کمک کند.

۷- پیوست

برای بررسی تقعر تابع سود تولیدکننده نیاز است تا ماتریس هسین این بازیکن موردبررسی قرار گیرد. ازاین‌رو، ماتریس هسین به‌صورت $\begin{pmatrix} -2\beta & \lambda - e\beta p_j \\ \lambda - e\beta p_j & -\kappa + 2e\lambda p_j \end{pmatrix}$ به دست می‌آید. این ماتریس نیمه معین منفی می‌باشد؛ زیرا مینور اول آن منفی و مینور دوم آن برابر $2\beta\kappa - \lambda^2 - e\beta p_j(2\lambda + e\beta p_j$ می‌شود. عبارت مینور دوم همواره به ازای شرط $\kappa > \frac{(\lambda+e\beta p_j)^2}{2\beta}$ همواره مثبت است. برای دولت نیز نیاز است تقعر بررسی شود. از این رو، مشتق دوم آن نسبت به متغیر تصمیم s به‌صورت $\frac{2\beta^2\kappa(-2\beta\kappa+\lambda^2+e\beta\lambda p_j)}{(-2\beta\kappa+\lambda^2+e\beta p_j(2\lambda+e\beta p_j))^2}$ به دست می‌آید. این عبارت نیز همواره به ازای شرط $\kappa > \frac{(\lambda+e\beta p_j)^2}{2\beta}$ منفی می‌شود. این شرایط در مثال عددی رعایت شده است.

مشارکت‌های نویسندگان

همه نویسندگان در مقاله نقش و سهم یکسان داشته‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

نویسندگان از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری و همچنین داوران محترم که کیفیت این مقاله را افزایش دادند، قدردانی می‌نمایند.

مراجع

Aghaie, V., Alizadeh, H., & Afshar, A. (2020). Emergence of social norms in the cap-and-trade policy: An agent-based groundwater market. *Journal of Hydrology, 588*, 125057. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125057

Ali, S., Badar, M. S., Nikkhah, A., Fen, C. S., Nouri, A., Mohammad, A. W., Lun, A. W., Nourigheimasi, F., Ng, L. Y., & Mahmoudi, E. (2024). Progress in nanomaterial-driven redox reactions for water purification: A critical review. *Desalination and Water Treatment, 319*, 100616. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100616

Almonti, D., Baiocco, G., & Ucciardello, N. (2021). Pulp and paper characterization by means of artificial neural networks for effluent solid waste minimization—A case study. *Journal of Process Control, 105*, 283–291. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2021.08.012

Badar, M. S., Ali, S., Daniyal, Akram, M. W., Faheem, K., Khan, S. U., & Farooqi, I. H. (2024). GIS-based assessment of groundwater vulnerability to heavy metal contamination via water quality pollution indices in urban Aligarh, India. *Water Practice & Technology, 19*(2), 419–434. https://doi.org/10.2166/wpt.2024.019

Burdack, D., Biewald, A., & Lotze-Campen, H. (2014). Cap-and-trade of water rights: A sustainable way out of Australia's rural water problems? *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society, 23*(4), 318–326. https://doi.org/10.14512/gaia.23.4.7

Cao, E., Du, L., & Ruan, J. (2019). Financing preferences and performance for an emission-dependent supply chain: Supplier vs. bank. *International Journal of Production Economics, 208*, 383–399. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.001

Chen, Z., Fang, L., & Wang, H. (2019). Internal incentives and operations strategies for the water-saving supply chain with cap-and-trade regulation. *Frontiers of Engineering Management, 6*(1), 87–101. https://doi.org/10.1007/s42524-019-0006-7

Ding, H., Zhao, Q., An, Z., & Tang, O. (2016). Collaborative mechanism of a sustainable supply chain with environmental constraints and carbon caps. *International Journal of Production Economics, 181*, 191–207. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.03.004

Giarola, S., Shah, N., & Bezzo, F. (2012). A comprehensive approach to the design of ethanol supply chains including carbon trading effects. *Bioresource Technology, 107*, 175–185. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.090

He, L., Gu, Q., Bian, J., Lai, K. K., & Zhang, X. (2023). To pool or not to pool in carbon quotas: Analyses of emission regulation and operations in supply chain supernetwork under cap-and-trade policy. *Annals of Operations Research, 324*(1–2), 311–353. https://doi.org/10.1007/s10479-022-04724-1

Jamali, M.-B., & Rasti-Barzoki, M. (2022). A game-theoretic approach for examining government support strategies and licensing contracts in an electricity supply chain with technology spillover: A case study of Iran. *Energy, 242*, 122919. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122919

Kamyab, M., & Abbasian, M. (2024). A review of effective nanofluid solutions for improving and optimizing water and wastewater treatment processes. *Journal of Science and Engineering Elites, 46*(9), 1–15. (In Persian)

Karkou, E., Teo, C. J., Savvakis, N., Poinapen, J., & Arampatzis, G. (2024). Industrial circular water use practices through the application of a conceptual water efficiency framework in the process industry. *Journal of Environmental Management, 370*, 122596. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122596

Kumar, A., & Thakur, A. (2024). Industrial water conservation by water footprint and Sustainable Development Goals. In *Current directions in water scarcity research* (Vol. 8, pp. 87–117). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23631-0.00007-8

Li, B., Zhu, M., Jiang, Y., & Li, Z. (2016). Pricing policies of a competitive dual-channel green supply chain. *Journal of Cleaner Production, 112*, 2029–2042. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.017

Mao, Z., Zhang, S., & Li, X. (2017). Low carbon supply chain firm integration and firm performance in China. *Journal of Cleaner Production, 153*, 354–361.

tradeoffs in regulating industrial water use: An agent-based model. *Journal of Environmental Management, 346*, 118988. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118988

Sun, H., Yang, J., & Zhong, Y. (2020). Optimal decisions for two risk-averse competitive manufacturers under the cap-and-trade policy and uncertain demand. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17*(3), 1010. https://doi.org/10.3390/ijerph17031010

Waheed, R., Sarwar, S., & Wei, C. (2019). The survey of economic growth, energy consumption and carbon emission. *Energy Reports, 5*, 1103–1115. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.07.006

Wang, Z., & Wang, C. (2015). How carbon offsetting scheme impacts the duopoly output in production and abatement: Analysis in the context of carbon cap-and-trade. *Journal of Cleaner Production, 103*, 715–723. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.069

Xu, X., He, P., Xu, H., & Zhang, Q. (2017). Supply chain coordination with green technology under cap-and-trade regulation. *International Journal of Production Economics, 183*, 433–442. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.029

Yang, L., Zhang, Q., & Ji, J. (2017). Pricing and carbon emission reduction decisions in supply chains with vertical and horizontal cooperation. *International Journal of Production Economics, 191*, 286–297. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.06.021

Yu-Jie, J., Jiang, K.-J., Sha, C., Xiang, P.-P., & Chen-Min, H. (2024). Water use in the industrial sector based on the IPAC model under the carbon-neutral transformation path in China. *Advances in Climate Change Research, 15*(5), 773–784. https://doi.org/10.1016/j.accre.2024.11.004

Zhang, B., & Xu, L. (2013). Multi-item production planning with carbon cap and trade mechanism. *International Journal of Production Economics, 144*(1), 118–127. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.01.024

Zhou, Y., Bao, M., Chen, X., & Xu, X. (2016). Co-op advertising and emission reduction cost sharing contracts and coordination in low-carbon supply chain based on fairness concerns. *Journal of Cleaner Production,* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.081

Mohammad Behrouzi Nejad, M. H. K., Sadi, S., & Shahsavan, A. (2024). Improving efficiency in municipal wastewater treatment based on advanced variable pore microfiltration systems. *Water and Energy Engineering, 2*(3), 1–20. (In Persian)

Norang, A., Eghbali, M. A., & Hajian, A. (2010, January). Supply chain analysis model based on system dynamics approach: A case of Iranian bicycle manufacturer. In *2010 International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM)* (Vol. 3, pp. 1481–1485). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICLSIM.2010.5461214

Safarzadeh, S., & Rasti-Barzoki, M. (2019). A game theoretic approach for assessing residential energy-efficiency program considering rebound, consumer behavior, and government policies. *Applied Energy, 233–234*, 44–61. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.032

Shi, B., Li, N., Gao, Q., & Li, G. (2022). Market incentives, carbon quota allocation and carbon emission reduction: Evidence from China's carbon trading pilot policy. *Journal of Environmental Management, 319*, 115650. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115650

Shokufeh Pira, S. N., & Asadi, A. (2022). An overview of recent achievements in the fabrication and modification of microfiltration antifouling membranes for water treatment. *Water and Wastewater Journal, 33*(4), 144–162. https://doi.org/10.22093/wwj.2022.334359.3246 (In Persian)

Sinayi, M., & Rasti-Barzoki, M. (2018). A game theoretic approach for pricing, greening, and social welfare policies in a supply chain with government intervention. *Journal of Cleaner Production, 196*, 1443–1458. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.212

Stankov, S. (2024). Prečišćavanje vode u procesnoj industriji. *Zbornik Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji–Procesing, 37*(1), 121–139. https://doi.org/10.5281/zenodo.12777595

Sun, D., Zhang, M., & Jung, D. (2023). Policy evaluation of economic–environmental

133, 402–413. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.097

Zhou, Y., Han, J., & Zhou, Y. (2024). Synergizing carbon trading and water management for urban sustainability: A city-level multi-objective planning framework. *Applied Energy, 359*, 122637. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122637